



## テントウムシ脚裏の接着原理を解明 ～なぜ、ガラスの上でも硬い脚先が滑らないのか。40年の議論にピリオド～

配布日時：2021年6月3日14時  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構

### 概要

1. NIMS は、東京大学、キール大学（ドイツ）と共同で長年の議論が続いていたテントウムシの脚裏の接着の原理を解明しました。
2. 持続可能社会では、これまでの「強力な接着」がリサイクル時に分離の妨げとなるため、「接着力があり、容易に剥離できる」という環境にやさしい新しい接着技術の開発が進められています。バイオミメティクス<sup>1)</sup>では、天井や壁を歩行する爬虫類や昆虫の脚の「接着と剥離」を迅速に繰り返せる機能が注目されており、本研究チームはテントウムシの優れた脚の機能に着目して研究開発を行いました。テントウムシの脚裏は剛毛なのにガラスのような平滑面をすべらずに歩くことができます。足裏からは分泌液も出ており、接着の原理については、剛毛と接地面の分子間力なのか、分泌液による表面張力なのか、これまで40年もの間、解明されていませんでした。
3. 今回、研究チームは、分子間力に影響する剛毛表面と基板間の「分泌液の厚さ」の測定に成功しました。ガラス基板の表面に高さ 10~20nm の AuPd 粒子<sup>2)</sup>を付着させこの粒子が分泌液に浸るかどうかを調べました。ガラス基板にテントウムシの脚を置いた状態で分泌液を瞬時に凍結し、脚を除いた表面を冷凍状態のまま Cryo-SEM 頸微鏡で観察し、AuPd 粒子が分泌液中に埋もれているかを調べました。その結果、分泌液の厚さ（足裏と表面の距離）が分子間力の働く距離であることが明らかになりました。そこで、分子間力が主要な力（他の接着原理よりも支配的）であるかを調べるため、バイオミメティクスと材料科学の手法を生物学に応用し、様々な基板上を歩行するテントウムシの「牽引力」を測定しました。もし主要な力が「分子間力」であれば、この接着力は、「接着仕事  $W_A$ 」<sup>3)</sup>というエネルギーと関連することが知られています。そこで、 $W_A$  と牽引力の関係式で実験結果の相関を調べたところ、テントウムシの接着力は接着仕事に相関することが分かり、主要な接着の原因是「分子間力（ファンデルワールス力<sup>4)</sup>」であることが証明されました。
4. 今後は、この成果を人工的な接着・剥離構造の開発に活用する計画で、テントウムシのように多様な場所へ移動できる災害対策ロボットの脚部への応用や、精密機器の部品着脱装置などへの応用を目指しています。
5. 本研究は、NIMS 構造材料研究拠点のグループリーダー細田奈麻絵、東京大学名誉教授須賀唯知（現 明星大学 客員教授）、中本茉里（元東京大学大学院生）、キール大学教授（ドイツ）Stanislav N. Gorb らの研究チームにより、JSPS 科研費 JP 24120005 及び防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の一環として行われました。
6. 本研究成果は、Scientific Reports 誌の 2021 年 4 月 8 日発行号（11, 7729）にて掲載されました。

## 研究の背景

持続可能社会ではリサイクルが重視され、これまでの「強力な接着」から「接着力があり、容易に剥離もできる」という新しい接着技術の開発が求められます。そこで、「接着と剥離」を繰り返す機能について、天井や壁を歩行できる爬虫類や昆虫の脚をモデルとして、バイオミメティクスとしての研究開発が進められています。爬虫類のヤモリでは、脚の接着機構が「分子間力」（ファンデルワールス力）であることが発見され、ヤモリをモデルとした接着テープの開発ブームを引き起こしました。

一方、テントウムシなどの昆虫も「接着と剥離」を迅速にできる優れた脚裏構造を持ちます。脚裏は細長い毛状構造（剛毛）で、硬い剛毛なのにガラスのような平滑面を滑らずに歩けます。1980年にマンチェスター大学の N. E. Stork はハムシ (*Chrysolina polita*) の研究において、脚裏の剛毛と基板が分子間力により接着している可能性を示しました。ただし、分泌液の量によっては表面張力（毛管力・ラプラス圧力）や凝集力も作用する可能性があるとしました。当時は分泌液の量を直接観察する技術がなく、分子間力の可能性は仮説に留まりました。このため、接着の原理が解明されないまま 40 年もの長い間、議論が続いていました。

西暦 2000 年前後になると、観察・測定技術の進歩を背景に、接着と剥離に優れたヤモリの足など、ナノレベルの「生物の微細構造」をモデルに研究開発が急速に進展しました。例えば、原子間力顕微鏡により動植物の表皮をナノスケールで構造観察したり、フォースセンサーによる微小な力を（ナノニュートン）測定したり、昆虫や小動物の観察における精密測定が可能となりました。これらの技術進歩により、それまで見えなかった生物の微細構造の観察や、微細構造がもたらす優れた機能が測定ができるようになりました。生物学的な発見が相次ぎました。

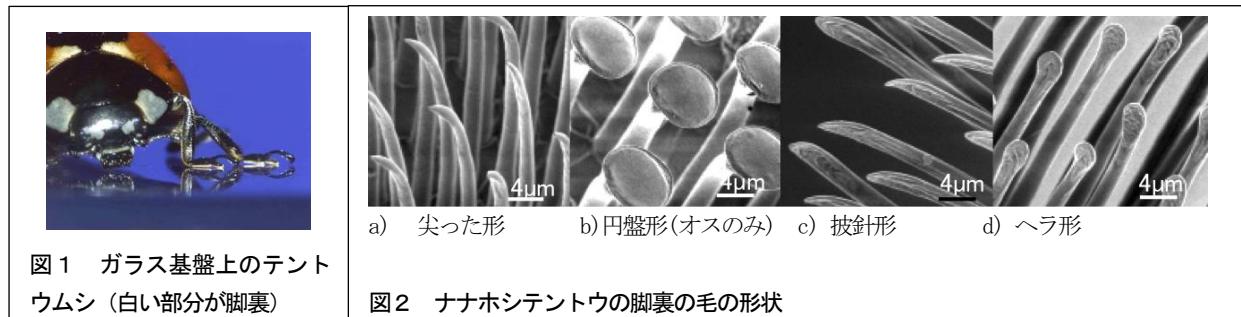
本研究は、このような観察・測定技術の進歩のもとで、バイオミメティクスと材料科学を組み合わせる手法を用いて、実験をもとにテントウムシの接着の原理を解明することに取り組んだものです。

## 研究内容と成果（目安の文量：半ページ～1ページ）

### ○テントウムシの脚裏は、剛毛なのに平滑なガラス基盤を滑らない

図1は、テントウムシが平滑なガラス基板上を歩行する写真で、白い部分が脚裏です。脚裏には細長い剛毛があり、先端形状は、a) 尖った形、b) 円盤形（オスのみ）、c) 披針形、d) ヘラ形などがあります（図2）。

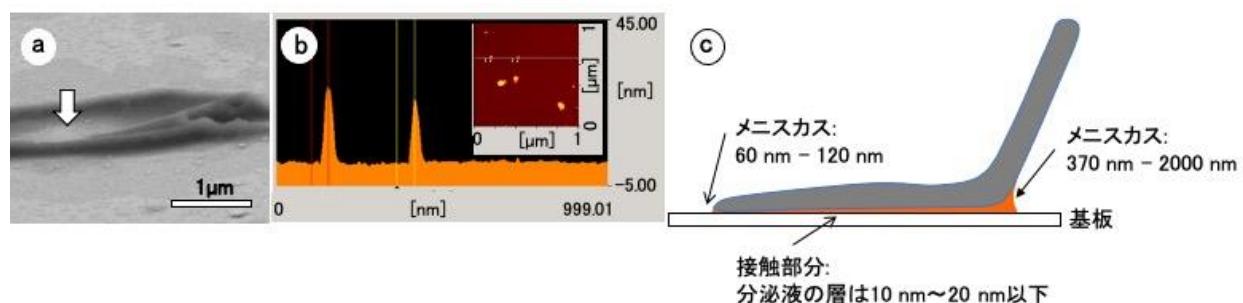
平滑なガラス基板を滑らずに歩行できるのは剛毛の接着力によりますが、接着の原因には「分子間力」や、剛毛の表面を覆う分泌液の量によっては「表面張力」や「凝集力」の作用などが考えられます。これまで分泌液の量は測定されておらず、この接着の主要な原因は解明されていませんでした。



### ○分泌液層を凍らせて厚さ測定に成功

我々は、テントウムシの分泌液層の厚さ（剛毛と基板の距離）の測定にはじめて成功し、「長距離での分子間力」が作用する範囲であることを確認しました。分子間力は短距離（数ナノメートル）で働きますが、高分子の場合には長距離（10 数 nm）でも作用します。測定方法は、ガラス基板の表面を直径 10~20nm の AuPd 粒子で覆い、テントウムシがガラス基板に脚を置いた状態で分泌液を瞬時に凍結し、脚を除いた表面を冷凍状態のまま Cryo-SEM 顕微鏡で観察して AuPd 粒子が分泌液中に埋もれているかを調べました。

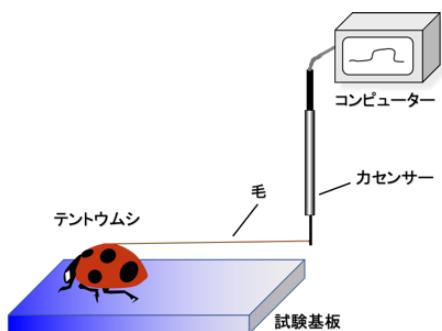
図3 (a) に示すように、脚跡（分泌液層）から AuPd 粒子（矢印）が飛び出していることが観察され、分泌液層の厚さは 10~20nm 以下であることを確認しました。なお、AuPd 粒子の高さは、脚裏を置く前に原子間力顕微鏡(AFM)で測定しています（図3(b)）。図3 (c) は、テントウムシがガラス基板に脚を置いたときの分泌液分布の模式図です。本研究では、剛毛の縁に見られるメニスカス（毛管現象などで曲率を持った面）を含め、脚裏の分泌液層の厚さ分布を確認しています。



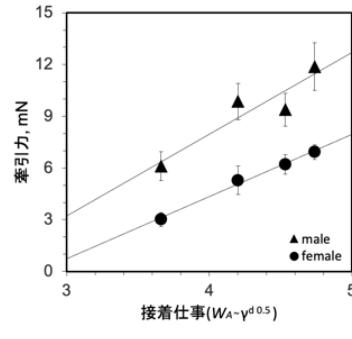
### ○原因が「分子間力」であることを、材料科学の手法で証明

接着の原因の判定には材料科学の「接着仕事  $W_A$ 」の概念を導入しました。接着仕事  $W_A$  は、基板の材質で変化します。異なる材質（表面エネルギーの高い順に、シリコンウェハ、ガラス、高分子材料 2 種類）の基板上を、テントウムシが歩く時の「牽引力」を測定しました（図4(a)）。接着力が大きいほど滑りにくく、牽引力が大きくなります。牽引力をもとに接着力を評価できます。 $W_A$  と牽引力の関係式で実験結果の相関を調べました（図 4(b)）。この結果より、テントウムシの接着力は接着仕事に相関することが分かり、主要な接着の原因是「分子間力（ファンデルワールス力）」であることが証明されました。

分子間力の中でも分散性成分が主であり、極性成分の影響は受けないことも分かりました。これは、テントウムシが分散性の高い成分を含む表面により強く付着できることを意味しています。植物の葉の多くはワックスで覆われており、分散性成分の高い表面になっています。このためテントウムシは、生息地の植物種に適応できる脚裏を発達させていたと考えられます。



(a) 奉引力実験の概略図



(b) 異なる表面エネルギーの基板上での奉引力。  
△はオス、○はメスのテントウムシ。

図4 テントウムシの奉引力測定

#### 今後の展開（目安の文量：～半ページ）

今後、この成果をもとに人工的な接着・剥離構造を開発し、テントウムシのように多様な場所へ移動できる災害対策ロボットの脚部への応用や精密機器の部品着脱装置などへの応用を目指していきます。

#### 掲載論文

題目 : Evidence for intermolecular forces involved in ladybird beetle tarsal setae adhesion.

著者 : Naoe Hosoda, Mari Nakamoto, Tadatomo Suga & Stanislav N. Gorb

雑誌 : Scientific Reports

掲載日時 : 2021年4月8日

#### 用語解説

##### (1) バイオミメティクス

生物学と工学を融合した取り組み。生物が創り出した優れた機能の原理を分析し、技術に移転することで技術革新をもたらす方法。

##### (2) AuPd

金パラジウム

##### (3) 接着仕事 $W_A$

接着部分を引き剥がすために必要なエネルギーで、次の式で表されます。

$$W_A = 2 \left( \sqrt{\gamma_A^d \gamma_B^d} + \sqrt{\gamma_A^P \gamma_B^P} \right)$$

ここで、 $\gamma_A^d$  と  $\gamma_B^d$  は基板と相手側の表面自由エネルギーの分散性成分、 $\gamma_A^P$  と  $\gamma_B^P$  は基板と相手側の表面自由エネルギーの極性成分です。

実験結果が、 $W_A$  に比例（表面自由エネルギーの分散成分の平方根に比例）していることから、テントウムシの接着力は分散性成分に相関し、極性成分の影響を受けないことが分かりました。

##### (4) ファンデルワールス力

原子や分子間に働く引力の一種。

**本件に関するお問い合わせ先**

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点、接合・造形分野、表面・接着科学グループ  
グループリーダー 細田奈麻絵 (ほそだなおえ)

E-mail:Hosoda.Naoe@nims.go.jp

TEL: 029-860-4529

(報道・広報に関するここと)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp